



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLASTNOSTI PALIV: HRUBÝ ROZBOR TUHÝCH PALIV

FUEL PROPERTIES: PROXIMATE ANALYSIS OF SOLID FUELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Kučera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petra Vavříková

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Ondřej Kučera**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petra Vavříková**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vlastnosti paliv: Hrubý rozbor tuhých paliv

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním ze současných trendů užití obnovitelných zdrojů je hledání využití odpadní a alternativní biomasy a odpadů. Pro možné využití těchto paliv je třeba je co nejpřesněji popsat.

Mezi základní charakteristiky tuhých paliv je tzv. hrubý rozbor, tedy určení zastoupení vody, popeloviny a hořlaviny v palivu. Práce se bude zabývat popisem metod určení a experimentálním ozkoušením těchto metod.

Cíle bakalářské práce:

- popis vlastností tuhých paliv
- metody určení hrubého rozboru
- provedení hrubého rozboru vybraných paliv

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá využitím biomasy jako alternativního zdroje energie a hrubým rozbořem tuhých paliv. V teoretické části je zpracována rešerše o energetickém využití biomasy a hrubém rozboru tuhých paliv. Podrobně jsou popsány jednotlivé metody určení hrubého rozboru, konkrétně stanovení obsahu vody, popela a prchavé hořlaviny a určení spalného tepla. V praktické části jsou prezentovány výsledky rozboru vybraných lokálně dostupných rostlinných biopaliv. Metody hrubého rozboru paliv byly úspěšně prakticky aplikovány.

Klíčová slova

Tuhá paliva, hrubý rozbor, biomasa, energetické plodiny, obnovitelné zdroje energie

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the use of biomass as an alternative energy source and proximate analysis of solid fuels. In the theoretical part there is a research on energy utilization of biomass and a proximate analysis of solid fuels. Individual methods of determination of proximate analysis are described in detail, namely determination of water, ash and volatile combustible content and determination of gross calorific value. The practical part presents results of analysis of selected locally available plant biofuels. The methods of proximate fuel analysis have been successfully applied.

Key words

Solid fuels, proximate analysis, biomass, energy crops, renewable energy sources

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUČERA, Ondřej. *Vlastnosti paliv: Hrubý rozbor tuhých paliv* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116678>. Bakalářská práce. 54 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Petra Vavříková.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vlastnosti paliv: Hrubý rozbor tuhých paliv** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Ondřej Kučera

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Petře Vavříkové za odborné vedení, ochotu a cenné rady a připomínky, které mi poskytla při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Haně Lisé Ph.D. za pomoc při měření.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Vývoj využívaných zdrojů energie.....	12
1.1 Současná snaha celosvětové energetiky.....	12
2 Paliva	14
2.1 Základní požadavky na paliva	14
3 Biomasa	16
3.1 Odpadní a cíleně produkovaná biomasa	16
3.2 Energetické využití biomasy.....	17
3.3 Energetické plodiny	17
4 Tuhá alternativní paliva	21
4.1 Výroba tvarových paliv	21
5 Hrubý rozbor	22
5.1 Voda v palivu.....	22
5.2 Popelovina v palivu	23
5.3 Hořlavina v palivu	23
5.4 Spalné teplo.....	23
5.5 Výhřevnost.....	23
6 Metody stanovení hrubého rozboru.....	24
6.1 Stanovení obsahu popela v tuhých biopalivech	24
6.2 Stanovení obsahu prchavé hořlaviny tuhých biopaliv	25
6.3 Stanovení obsahu vody tuhých biopaliv	26
6.4 Stanovení spalného tepla a výpočet výhřevnosti tuhých biopaliv	28
7 Výsledky a zhodnocení experimentální části	30
7.1 Provedení hrubého rozboru.....	30
7.2 Stanovení obsahu prchavé hořlaviny	37
ZÁVĚR.....	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	46
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK	49
SEZNAM PŘÍLOH	50

ÚVOD

Trendem současné doby, způsobeným mimo jiné i důsledky globálních klimatických změn, je snaha hledat nová alternativní paliva. [1] Rozsáhlejší využívání obnovitelných zdrojů energie se pro blízkou budoucnost stává zcela nezbytným. Spolehlivým zdrojem obnovitelné energie je biomasa. Jako biomasu lze označit veškerou organickou hmotu na Zemi. Pro energetické využití je nejvhodnější biomasa rostlinná. Rostliny pomocí fotosyntézy akumulují sluneční energii a některé spotřebují více oxidu uhličitého, než vznikne při jejich energetickém využití. [2] Využitím moderních technologií pro úpravu rostlinné biomasy lze získávat paliva ve všech skupenstvích. Příkladem moderních paliv nahrazujících konvenční fosilní paliva mohou být dřevní pelety a brikety, bionafta nebo bioplyn. [3] Aktuálnost tématu energetického využití biomasy dokazuje rovněž řada odborných prací zabývajících se palivy, jejich rozbor, zpracováním a využitím, ve vědeckých publikacích, např. [4] [5] [6].

Pro využití paliv z biomasy je zapotřebí přesná charakterizace jejich vlastností. Mezi základní metody analýzy tuhých paliv patří tzv. hrubý rozbor, který zahrnuje stanovení výhřevnosti, koncentrace vody, nespalitelného popela a těkavé hořlaviny v palivu. Bakalářská práce se zabývá zejména popisem metod určení hrubého rozboru paliv a praktickým aplikováním metod na místně dostupných vzorcích biomasy z technických plodin.

1 Vývoj využívaných zdrojů energie

„Zhruba 20 % populace využívá až 80 % všech energetických zdrojů na světě. Nejrozvinutější státy, jako např. USA, spotřebovávají až 20 % ropy, přičemž počet jejich obyvatel tvoří jen cca 5 % světové populace. Podobné srovnání nám nabízí jiné údaje, které hovoří o tom, že obyvatelé USA spotřebují 20 až 30 krát více fosilní energie na osobu než lidé v rozvojových zemích. Další výpočty upozorňují na to, že nejbohatší miliarda lidí spotřebovává 50 % energie, zatímco ta nejhudší pouhých 5 %. Tato čísla společně vyvolávají otázky po řešení ekologické krize a odpovědnosti za život a blahobyt lidstva jako celku.“ [7]

Od počátku lidské civilizace až do začátku průmyslové revoluce šlo výhradně o využívání obnovitelných zdrojů. Uhlí, ropa a zemní plyn, tedy takzvaná fosilní paliva, se dostaly do popředí teprve v posledních několika stoletích. Tyto zdroje se ovšem jednoho dne vyčerpají, a pokud má civilizace i nadále fungovat, bez obnovitelných zdrojů to nepůjde. Jejich význam je na vzestupu už nyní a to díky vzrůstajícím cenám fosilních paliv a také v neposlední řadě díky jejich dostupnosti v místě potřeby. [8] [9] [10]

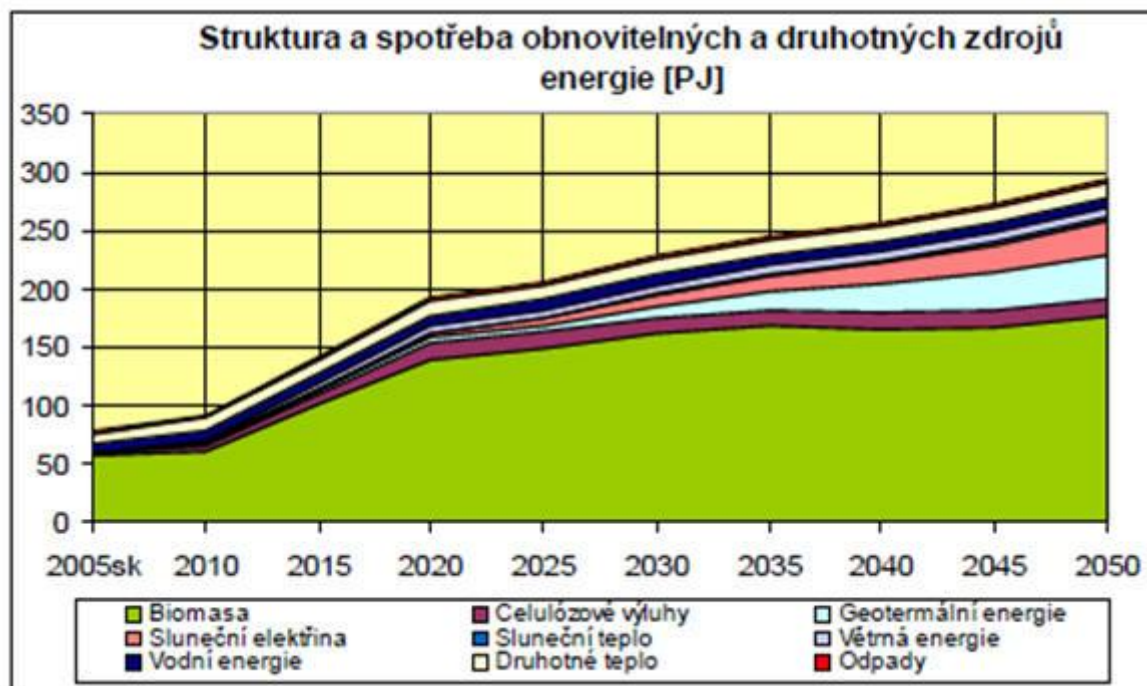
Celý proces využívání obnovitelných zdrojů však nevychází pouze ze snahy vypořádat se s problémem omezených zásob fosilních surovin, ale také souvisí s potřebou řešit ekologické aspekty problematiky získávání energie. Problém se týká celosvětové ekonomiky a tím pádem se problematikou obnovitelných zdrojů musí zabývat i Česká republika. V této oblasti je vypracovaná Státní energetická koncepce - strategický dokument schválený vládou. Tento materiál definuje jasně veškeré priority i konkrétní nástroje týkající se této oblasti prozatím s výhledem do roku 2030. Vychází z ekonomických, přírodních i geograficko-klimatických možností státu. Otázka obnovitelných zdrojů se také stala hybnou silou pro výzkum a vývoj v této oblasti. V neposlední řadě k tomuto trendu vedla také nutnost co nejefektivněji využít odpadní materiály vznikající v různých odvětvích, které se již nevypálí skládkovat. Objem tzv. vedlejších produktů se daří jejich využíváním snížit o více jak 50 %. Svoje využití tak nachází například ve stavebnictví, zemědělství a také v energetice. Současně pak dochází lokálně k rozvoji ekonomiky, energetické nezávislosti a význam má i pozitivní vliv na nezaměstnanost. [8]

1.1 Současná snaha celosvětové energetiky

Energetika je jedním z nejvíce se vyvíjejících odvětví poslední doby a energetické trhy se otvírají dalším skupinám zákazníků. Investice do takzvané zelené energie napříč planetou rostou, v posledních několika letech přesáhly 300 miliard dolarů. Energetickou politiku lze charakterizovat v několika následujících bodech [11] [10]:

- co nejčistší výroba energie a dosažení energetické soběstačnosti,
- snižování emisí uhlíku s cílem postupně přejít na nízkouhlíkový systém z důvodu omezení klimatických změn,
- využití obnovitelných zdrojů – investovat finance do solární a větrné energetiky a celé škály experimentálních „čistých“ zdrojů, obnovitelná energie může být dostupná kdekoli a kdykoli,
- zpomalení růstu globální spotřeby energie.

Z následujícího obrázku je vidět, že se daří tuto energetickou politiku plnit a využívat obnovitelné zdroje. Největší nárůst lze vidět ve využívání biomasy, sluneční, větrné a vodní energie. Nemalý význam má i využívání odpadů.



Obr. 1 Graf vývoje spotřeby obnovitelných zdrojů energie [11]

2 Paliva

„Palivo je všeobecné označení pro chemickou látku nebo jejich směs, mající schopnost za vhodných podmínek začít a udržet chemickou reakci spalování. Při spalování se uvolňuje chemická energie obsažená v palivu a přeměňuje se hlavně na tepelnou energii, kterou je možné dál využít. Specifickou skupinou paliv jsou pohonné hmoty.“ [12]

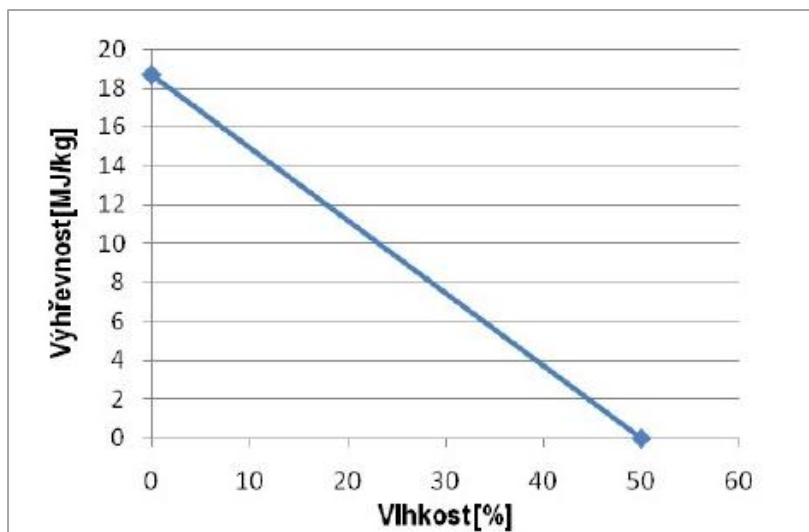
Paliva se dělí podle skupenství na tuhá, kapalná nebo plynná a slouží jako zdroj koncentrovaně uložené energie, kdy z relativně malého množství materiálu lze získat velké množství energie, která se dále využívá ve všech oblastech společnosti jako například k výrobě tepla, elektrické energie nebo v dopravě. [9]

2.1 Základní požadavky na paliva

Téměř všechny látky, které mají být využity jako paliva, se podrobují úpravám. Smyslem těchto úprav je zušlechťování paliv tj. dosažení lepších vlastností. Upravená paliva musí splňovat požadavky [13] uvedené níže.

Vysoká výhřevnost

Výhřevnost je základním parametrem kvality paliva. Umožňuje vyjádřit množství chemicky vázaného tepla, které se uvolní při dokonalém spálení jednotkové hmotnosti paliva. Hodnota výhřevnosti roste se zvyšujícím se obsahem hořlaviny a naopak klesá, pokud palivo obsahuje vyšší koncentraci vody a popeloviny. [13]



Obr. 2 Graf závislosti výhřevnosti na obsahu vody v palivu [14]

Snadná spalitelnost

Spalování probíhá v prostoru zvaném ohniště. Pevná paliva se běžně spalují v ohništích roštových – na roštu se vytvoří vrstva paliva s minimálním propadem a optimálním přívodem vzduchu. Palivo se zde postupně vysouší, zahřívá, zapálí, vyhoří a hromadí se zde nespalitelné zbytky. Technologická provedení roštů jsou pestrá. Tento model se jeví jako vhodný pro spalování biomasy, přestože jeho nevýhodou je nižší relativní účinnost spalování, vyšší produkce emisí a struskování, protože zařízení je jednoduché, provozně odolné a umožňuje dosažení poměrně vysoké teploty spalování až 1400 °C. Dalším typem jsou ohniště prášková vyvinutá ke spalování prachového uhlí. Palivo je do kotle vnášeno pomocí

vhodného média prostřednictvím hořáku. Výhodou je vysoká rychlost spalování i výkon, nevýhodou pak nutnost sušení a mletí či vyšší produkce CO. Posledním typem jsou ohniště fluidní, ve kterých je palivo umístěno na pórovité přepážce, skrz kterou protéká médium s výrazně nižší hustotou. Postupně dojde k promíchání složek a směs začne vykazovat vlastnosti kapaliny. Fluidní způsob je nejefektivnější a současně produkce emisí je nejnižší, a proto se využívá pro méně kvalitní paliva a biomasy. [13]

Při hoření bezdýmná

Hoření je exotermická samovolná reakce, iniciovaná nejčastěji lokálním zvýšením teploty. V průběhu této reakce dochází k oxidaci organických látek. Je-li ovšem vedena nevhodně, vyskytují se ve spalinách nežádoucí látky jako například saze, oxid uhelnatý, oxidy dusíku aj. Spalování paliv tedy souvisí s produkcí emisí a to platí jak pro paliva fosilní, tak i pro biomasu. Vliv má samotné topeniště i technologie procesu spalování. Téměř neovlivnitelná je produkce SO₂, tuhých částic či toxických kovů, naopak vhodným vedením procesu spalování lze výrazně snížit produkce CO a oxidů dusíku. [13]

Spalitelnost beze zbytku

Součástí některých paliv jsou také minerální složky, které tvoří po spálení paliva tzv. popílky. Složení popílku je tedy různorodé a popílek proto vykazuje odlišné fyzikální a chemické vlastnosti. [13]

Dobrá manipulovatelnost, skladovatelnost a přeprava

Nevýhodou paliv jsou náklady na jejich logistiku. U biomasy tedy cenu můžeme snížit tím, že její cílenou produkci budeme lokalizovat co nejbližší místům jejího zpracování a využití. Skladování musí být vždy bezpečné a ekologicky nezávadné. [15]

3 Biomasa

Biomasa je obecně řečeno látka biologického původu – rostlinného i živočišného, která se účastní koloběhu živin v biosféře. Jedná se o těla všech organismů od největších druhů živočichů a rostlin, až po mikroskopické bakterie a sinice. [16] [17]

Biomasu lze členit podle různých kritérií, pro účely této práce je důležité rozdělení podle způsobu získávání na cíleně pěstovanou biomasu v podobě energetických plodin a odpadní biomasu. [18]

Při získávání energie z biomasy je sluneční energie, která byla transformovaná do biomasy během růstu, znovu využitelná. Významný je tzv. uzavřený uhlíkový cyklus, tedy množství CO_2 produkovaného při spalování se rovná nebo je menší než množství spotřebované rostlinami během růstu. Na rozdíl od solárních či větrných technologií je produkce energie z biomasy typická stabilním výstupem a tím pádem bezproblémovým napojením na elektrickou soustavu. V následujícím obrázku jsou uvedeny výhody a nevýhody spojené s využíváním biomasy. [16] [19]

Výhody	Nevýhody
využití odpadu	účinnost při výrobě elektřiny
dostupnost technologií pro spalování	v některých případech nutná úprava paliva
vyrovnaná bilance oxidu uhličitého	náklady na některé typy úpravy
energie je stále dostupná	náklady na dopravu
možnosti úpravy paliva	nustnost skladovacích prostor
možnost využití v domácnostech	výroba není bez emisí

Obr. 3 Výhody a nevýhody spojené s využíváním biomasy [16]

3.1 Odpadní a cíleně produkovaná biomasa

Odpadní biomasu produkují malé domácnosti i jednotlivá průmyslová odvětví. Další využití tak běžně nachází zbytková biomasa z lesnictví – dřevní odpad, štěpka, kůra, hobliny aj., zbytková biomasa ze zemědělství – sláma, obaly olejnatých semen, chlévská mrva a dále pak kaly z čistíren, biologicky rozložitelný odpad i například masokostní moučka.

Velký význam ovšem získává také cíleně produkovaná biomasa. Dobré zkušenosti jsou s pěstováním rychle rostoucích dřevin například topolů, olší, akátů nebo vrb a tzv. energetických plodin jako jsou šťovík, amaranthus, košťava či konopí. Za výhodný je možné považovat snadný výsev, krátké vegetační období i využití k více účelům. Důležitý je maximální přírůstek rostlinné hmoty na jednotku plochy s minimem vynaložených nákladů na ošetřování rostlin. [16] [20]

3.2 Energetické využití biomasy

Biomasa se používá ve všech skupenstvích – v plynném, kapalném i pevném. Cílovým produktem je teplo, elektrická energie, popřípadě kombinace obojího – tzv. kogenerace a také pohonná hmota. Kogenerace využívá odpadní teplo vzniklé při výrobě elektrické energie k vytápění, které by jinak bylo vypouštěno do okolí. [21] Před konečným využitím se biomasa zpracovává různými technologickými procesy. [17]

Mechanická úprava

Prvním krokem při využití biomasy je mechanická úprava. Cílem je dosáhnout takové podoby biomasy, která bude vhodná jak pro přepravu, tak i pro samotné energetické využití. Mezi mechanické úpravy biomasy jsou řazeny řezání, drcení, štěpkování a lisování. [17]

Technologie zpracování

Technologie zpracování biomasy se dělí na suché a mokré procesy. Suché procesy lze označit jako termické procesy, řadí se sem spalování, karbonizační rozklad, pyrolýza a zplyňování. Mokré procesy zahrnují biochemické i chemické přeměny jako jsou alkoholové a metanové kvašení nebo esterifikace.

Základním termickým procesem je spalování biomasy. Dále se provádí karbonizační rozklad bez přístupu vzduchu. Jedná se v podstatě o nejstarší metodu zušlechťování dřeva pro energetické účely. Tento proces probíhá formou suché destilace v karbonizačních pecích a retortách¹ a hlavním produktem je dřevěné uhlí. Dalším procesem je katalytická pyrolýza založená na rozkladu organických látek bez přístupu kyslíku na nízkomolekulární sloučeniny. Tato metoda umožňuje využití komunálního odpadu či plastů k výrobě pyrolytického oleje. K přeměně nejen odpadního dřeva či slámy na plynné produkty se využívá zplyňování. Vzniklý generátorový plyn se dá využít jako palivo nebo zdroj energie.

Z rostlin obsahujících cukr a škrob vzniká alkoholovým kvašením a následnou destilací bioethanol, který lze využít jako ekologické palivo pro spalovací motory. Při anaerobní fermentaci neboli metanovém kvašení se přeměňují odpadní kaly, vznikající v technologii čištění odpadních vod, na bioplyn. Oleje z olejnatých rostlin se esterifikací mění na methylester, typickým produktem je methylester řepkového oleje s obchodním označením MEŘO, který se dá mísit s motorovou naftou a používat jako palivo do vznětových motorů. [16] [13] [3]

3.3 Energetické plodiny

Pro energetické účely se biomasa produkuje ve formě tzv. energetických plodin s využitím v různých odvětvích. Publikace uvádí zhruba stovku různých plodin rostoucích po celém světě jako vhodný potenciální zdroj biomasy. [22] Plodiny jsou jednoleté, určené pro rychlou produkci nebo víceleté, kde sklizeň biomasy přichází až druhým nebo třetím rokem. Vytrvalé energetické plodiny vykazují i přes vyšší počáteční náklady vyšší energetickou efektivitu a nezanedbatelný je i jejich přínos k ochraně před erozí půdy a navýšení retenční kapacity krajiny.

¹ Nádoba nebo komora určená k suché destilaci

Jde o poměrně složité palivo, při spalování se organický materiál rozkládá na hořlavé plyny s různými spalovacími teplotami, což často vede k tomu, že hoří pouze část paliva, proto proces vyžaduje dokonalé promísení se vzduchem a vysokou teplotu. [23]

V textu níže jsou popsány vybrané plodiny, u kterých byl v rámci experimentální části prováděn hrubý rozbor.

Lnička setá

Olejnina s možnostmi využití v potravinářství i průmyslu. Jde o starou kulturní plodinu, která v dnešní době hledání nových alternativ pro zdroje surovin prochází svoji renesancí. Tato jednoletá bylina patří do čeledi brukvovitých. Dorůstá výšky 60 – 120 cm. Pěstování neklade velké nároky ani na stanoviště ani na kvalitu půdy, není náchylná na choroby a škůdce. Vegetační doba trvá pouhé 3 - 4 měsíce, lze ji tedy pěstovat i jako meziplodinu. Velkou výhodou při sklizni je fakt, že není náchylná k pukání šesulí a výdrolu. Se sklizní se tedy může počkat, až dozrají všechna semena. Po sklizni se musí semena dočistit a dosušit. Semeno obsahuje průměrně 8 % vody, 23 % dusíkatých látek, 30 % tuku, 22 % bezdusíkatých výtažkových látek, 9 % vlákniny, 7,3 % popelovin. [24] Využití se nabízí v potravinářství jako pokrmový tuk, ve zpracovatelském průmyslu na výrobu barev, laků, mýdel či bionafty. Pokrutiny obsahují poměrně cenné látky pro výživu drůbeže, plevy lze zkrmovat nebo spalovat. Stonky lze také spalovat nebo slouží k výrobě buničiny. [25]

Len setý

Jedna z nejstarších pěstovaných plodin. Z hlediska využití se len dělí na přadný a olejný. Jednoletá samosprašná bylina patří do čeledi lnovitých. Výška rostliny se pohybuje mezi 60 – 85 cm. Na pěstování neklade velké nároky, jde ale o rostlinu dlouhého dne, což znamená, že kvete a dozrává až během dlouhých letních dnů. Semena jsou uložena v tobolce. Při pozdní sklizni může docházet ke ztrátám z důvodu vypadávání semen. Semena mají využití ve zpracovatelském průmyslu na výrobu mýdel, laků, barev, tmelů, změkčovadel, pryskyřic nebo tiskových barev. Dále jsou využita ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Pokrutiny lze zkrmovat, ze slámy vyrábět buničinu. Semena i slámu je také možno celkem výhodně spalovat. [26]



Obr. 4 Lnička setá [40]



Obr. 5 Len setý [41]

Světlice barvířská

Teplomilná jednoletá bylina krátkého dne z čeledi hvězdnicovitých. Rostlina je středně náročná na půdu a má poměrně dlouhou vegetační dobu. Dozrává na přelomu srpna a září. Lodyha dosahuje výšky 80 – 150 cm. Plodem je nažka uložená v úboru. Ze semen se lisuje olej, což je vzhledem k tvrdým slupkám obtížné. Patří ovšem k nejkvalitnějším olejům studené kuchyně. Květy rostliny se používají jako přírodní žluté barvivo. Pokrutiny obsahují bílkovinu a jsou poměrně kvalitním krmivem. Pokud se porost sklídí ve vegetativní fázi, lze ho využít jako píce. Použita může být jako meziplodina na zelené hnojení. [26]

Krambe habešská – Katrán

Jednoletá plodina s krátkou vegetační dobou z čeledi brukvovitých. Vysokých výnosů dosahuje na lehčích půdách, je odolná vůči suchu a snáší teploty až do -4 °C. Plody jsou jednosemenné šešule, které při dozrávání mohou vypadávat. Olej lisovaný ze semen se využívá k technickým účelům díky vysokému obsahu kyseliny erukové – výroba plastů, emulgátorů, laků, aditiv, léčiv aj. Pokrutiny se zkrmují díky vysokému podílu vlákniny, proteinů a aminokyselin. Semena a také sláma se hodí ke spalování. [26]



Obr. 6 Světlice barvířská [42]



Obr. 7 Krambe habešská [43]

Laskavec (Amaranthus)

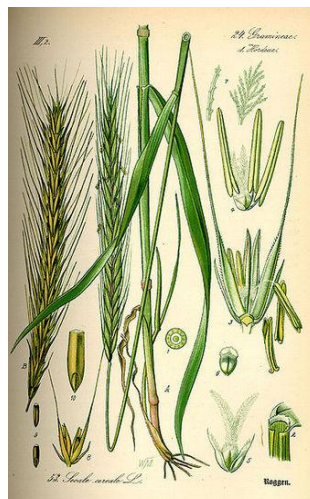
Tato jednoletá bylina z čeledi laskavcovitých je považován za plodinu 21. století, protože by mohla přispět k odstranění hladomoru v některých oblastech. Celý rod zahrnuje více jak 60 druhů s pestrým využitím. Nejčastěji se pěstuje na semeno, které má vysokou výživovou hodnotu. Je nenáročný na půdní podmínky, vyžaduje ovšem dostatek tepla a světla. Listy a stonky se dají u některých forem využít jako zelenina, píce pro zvířata a zelené hnojení. Rostlina je také řazena mezi energetické plodiny jako zdroj biomasy. [27]

Žito seté

Poměrně mladá kulturní plodina vhodná pro pěstování v lehčích půdách. Snáší i horší klimatické podmínky, ale vyžaduje dostatek vláhy. Využití nachází převážně v potravinářství a také ve farmacii. Ke krmným účelům se používá omezeně díky poměrně nízké výživové hodnotě. Některé odrůdy jsou přímo určeny k produkci biomasy. [28]



Obr. 8 Laskavec [44]



Obr. 9 Žito seté [45]

Hořčice polní

Jednoletá jarní bylina z čeledi brukvovitých je považována za plevel, který je rozšířený po celém území České republiky. Plody jsou válcovité šešule se zobanem. Hořčičná semínka obsahující bílkovinu, olej, slizy a glykosidy se využívají v potravinářství. Svoje uplatnění nachází i v léčitelství na zábaly, obklady a masážní oleje. Krmná hodnota je nízká. Je možné ji přímo spalovat včetně semen nebo jen slámu po vymlácení. [29]

Slunečnice roční

Bylina z čeledi hvězdnicovitých se vyskytuje až v 60 druzích, některé rostliny jsou jednoleté, jiné vytrvalé. Vyžaduje slunné stanoviště a dostatek vláhy. Využívají se semena a okvětní lístky. Ze semen se lisuje olej vhodný pro potravinářské a kosmetické účely, v zemědělství se využívá jako pícnina pro krmení dobytka. Z oleje se vyrábí také mazadla, fermeže i mýdla, z okvětních lístků se tvoří čajové směsi. Zbytky ze zpracování jsou energeticky využitelné. Rostlina je medonosná. [30]



Obr. 10 Hořčice polní [46]



Obr. 11 Slunečnice roční [47]

4 Tuhá alternativní paliva

Takové palivo je tvořeno směsí spalitelných materiálů přírodního nebo umělého původu a nesmí obsahovat nebezpečný odpad. Je určeno k energetickému využití. Výroba je v mnoha ohledech výhodná oproti spalování takového materiálu. Jsou vhodná k dlouhodobému skladování, upravují se drcením a lisováním do pelet a briket pro usnadnění manipulace a přepravy. Obecné požadavky na tuhá paliva jsou popsány v novele vyhlášky 357/2002 Sb. [31]

4.1 Výroba tvarových paliv

Dřevní štěpky – rozdrcený odpad vznikající při těžbě dřeva popřípadě pochází z cíleně pěstovaných rychle rostoucích dřevin. Obsah vody se po vysušení pohybuje kolem 30 %, výhřevnost je závislá na obsahu vody a pohybuje se v intervalu 8-12 MJ/kg.

Pelety – vyráběny silným stlačením vybrané biomasy za tlaku až 31 MPa a při teplotách, kdy lignin plastifikuje a plní funkci pojiva. Materiál se objemově redukuje v poměru až 12:1 a má vysokou tepelnou výhřevnost 16-18 MJ/kg. Průměr válcových pelet je zhruba kolem 5 mm a délka 20 mm. Vlhkost je nízká a stabilní kolem 8%. Vhodné jsou pro celou škálu kotlů i kamen. Nejběžnější jsou pelety dřevné, kůrové, rašelinové i směsné. Hořením pelet vzniká minimální množství kouře.

Brikety – materiál se lisuje podobně jako pelety, ale při nižším tlaku. Válečky mají průměr kolem 100 mm a dlouhé jsou 200 mm a více. Používají se obdobně jako kusové dřevo, ale při hoření se rozpadají. [32]



Obr. 12 Brikety a pelety [32]

5 Hrubý rozbor

Jednotlivé druhy pevných paliv se vyznačují svými specifickými vlastnostmi, které je nutné respektovat při volbě konkrétní technologie spalování. Pouze tak lze dosáhnout maximálně efektivního využití energetického potenciálu paliva. Svou úlohu hraje hrubý rozbor i elementární analýza určující poměr hmotnostního zastoupení jednotlivých prvků v hořlavině. Významnou roli hraje i forma paliva – tvar, velikost, zrnitost. Menší velikost částic paliva představuje vyšší měrný povrch a rychlejší uvolnění akumulované energie.

Hrubý rozbor je jednou ze základních metod určujících složení tuhých paliv. Určuje poměr mezi hořlavinou, popelovinou a vodou obsažených v palivu. [18]

$$h + A^r + W^r = 100\% \quad (5.1)$$

h...hořlavina

A^r...popelovina

W^r...voda

r...index, který značí, že se jedná o hmotnostní obsahy v surovém stavu

přimísená voda	← Surové uhlí →		
	voda W^r	popeloviny A^r	hořlavina h
přítež (balast)		prchavý podíl	tuhý podíl
		bezvodé uhlí (sušina)	
spálením vznikne:			
vodní pára	tuhé zbytky – škvára (struska), popílek		spaliny

Obr. 13 Tabulka hrubého rozboru tuhých paliv, platná i pro biomasu [33]

5.1 Voda v palivu

Přítomnost vody obsažené v naprosté většině tuhých paliv je nežádoucí, protože snižuje výhřevnost a komplikuje spalování a dopravu paliva. Může docházet k zamrzání nebo nalepování částic paliva na stěny dopravních cest a přepravních vagónů. Při spalování odchází voda se spaliny ve formě vodní páry a zvětšuje tak objem spalin. Urychluje korozi kotle při poklesu teploty spalin pod rosný bod vody.

Vodu dělíme podle způsobu výskytu v palivu na [18]:

- přimísenou – dostává se do paliva během těžby nebo přepravy, odstranitelná odkapáváním nebo odstředováním,
- povrchovou – ulpívá na povrchu zrn paliva,
- kapilárně vázanou – obsažená v kapilárách a pórech paliva, lze odstranit vysušením,
- chemicky vázanou – vázána v chemické struktuře, nelze odstranit, uvolní se až při hoření paliva.

Další možné rozdělení vlhkosti je podle využití materiálu:

- absolutní (dřevařská) vlhkost,
- energetická vlhkost.

Absolutní vlhkost se používá, pokud je materiál využíván v dřevozpracujícím průmyslu a není primárně určen jako palivo. Vypočítá se jako poměr váhy vody obsažené ve vzorku k váze suchého bezvodého vzorku. Naopak pro materiál, který je výhradně určen ke spalování je důležitá energetická vlhkost, což je poměr váhy vody k původní váze celého vzorku. [34]

5.2 Popelovina v palivu

Popeloviny jsou minerální látky (křemičitany, uhličitany a další) obsažené v tuhém palivu před spálením. Spálením vzniká z popelovin tuhý zbytek nazývaný popel. Pro provoz kotlů jsou velmi důležité charakteristické teploty popela, které určují chování popela při různých teplotách, jedná se o teploty měknutí, tavení a tečení. [33] [35]

5.3 Hořlavina v palivu

Hořlavina je nositelem tepla uvolněného spalováním. Sestává se z uhlíku, vodíku, síry, dusíku a kyslíku. Dělí se na dvě složky, prchavou a tuhou hořlavinu. Prchavá hořlavina je důležitou vlastností tuhých paliv, uvolňuje se při začátku spalování při teplotách nad 250 °C a napomáhá vzněcování paliva a stabilizuje proces hoření. Jestliže prchavá hořlavina plně nevyhoří, odchází se spaliny kotle a vzniká ztráta nedopalem. Tuhou hořlavinu tvoří neprchavý zbytek v podobě uhlíku. [33] [35]

5.4 Spalné teplo

Spalné teplo Q_s [MJ/kg] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva a stechiometrického množství kyslíku s následným ochlazením spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje, tj. je v kapalně fázi. [35]

5.5 Výhřevnost

Výhřevnost Q_i [MJ/kg] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva a stechiometrického množství kyslíku s následným ochlazením spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách kondenzovat nebude, tj. zůstane v plynné fázi. [35]

Výhřevnost je důležitou energeticky-ekonomickou vlastností paliva. Udává informaci o obsahu energie v palivu. Určuje se výpočtem ze spalného tepla podle rovnice. [18]

$$Q_i = Q_s - 2,454 \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (5.5)$$

Q_i ...výhřevnost tuhého biopaliva [MJ/kg]

Q_s ...spalné teplo tuhého biopaliva [MJ/kg]

W^r ...relativní vlhkost tuhého biopaliva v původním stavu [-]

H_2 ...obsah vodíku v biopalivu [-]

6 Metody stanovení hrubého rozboru

Metody stanovení popisují jednotlivé průběhy zkoušek paliv. Postupy jsou dané normami ČSN ISO EN 18122, 18123, 18134-3 a 18125. Pro správné a směrodatné dosažení výsledků je nutné se normovanými postupy řídit. Pro názornou představu je popis metod doplněn o fotografie, které byly pořízeny během experimentu.

6.1 Stanovení obsahu popela v tuhých biopalivech

Stanovení obsahu popela bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 18122 Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu popela.

Podstatou metody je spálení vzorku na vzduchu při řízené teplotě $550\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ za přesně stanovených podmínek. Obsah popela je stanoven výpočtem z hmotnosti zbývající po spálení vzorku.



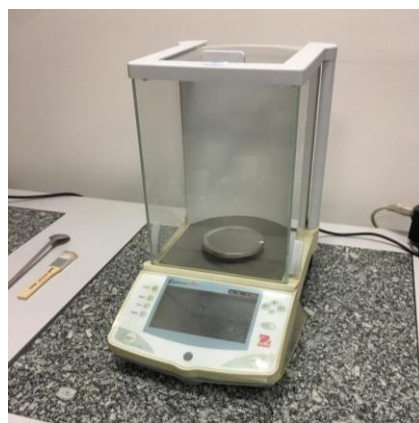
Obr. 14 Komorová laboratorní pec
[48]



Obr. 15 Vzorky připravené v peci ke
spálení



Obr. 16 Exsikátor k uchovávání vzorků a
kelímků



Obr. 17 Analytické laboratorní váhy

Postup stanovení začíná žiháním prázdného kelímku v peci při teplotě $550\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ po dobu nejméně 60 minut. Kelímek je poté vyjmut a nechá se chladit na tepelně odolné desce 5 až 10 minut a potom je přenesen do exsikátoru k dochlazení na laboratorní teplotu. Vyžíhaný a ochlazený kelímek je zvážen s přesností na 0,1 mg a hmotnost je zaznamenána. Analytický vzorek musí být před navážením zkušebního podílu důkladně promíchán. Na dno kelímku je vložen zkušební podíl o minimální hmotnosti 1 g a pravidelně rozprostřen. Nyní je kelímek i se zkušebním podílem znovu zvážen s přesností na 0,1 mg a hmotnost je zaznamenána. Pokud se očekává malé množství popela, je možné použít větší množství zkušebního podílu, s tím souvisí i použití většího kelímku. Následuje spálení zkušebního podílu. Kelímek se zkušebním podílem je vložen do chladné pece a zahříván podle programu. Program se skládá ze dvou částí. V první části se teplota rovnoměrně zvyšuje na 250 °C po dobu 30 až 50 minu rychlostí 4,5 až 7,5 °C/minutu . Na této teplotě se setrvá 60 minut, aby se před zapálením uvolnily těkavé látky. V druhé části nárůst teploty pokračuje na $550\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ po dobu dalších 30 minut rychlostí 10 °C/minutu . Na konečné teplotě se setrvá nejméně 120 minut. Po dokončení programu je kelímek s popelem vyjmut z pece a nechá se chladit 5 až 10 minut na tepelně odolné desce, poté je přenesen do exsikátoru k dochlazení na laboratorní teplotu. Kelímek s popelem je nyní zvážen s přesností 0,1 mg a hmotnost je zaznamenána. Pokud vznikne pochybnost, že nedošlo k úplnému spálení vzorku, potom je vzorek znovu vložen do horké pece vyhřáté na $550\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ na dobu 30 minut nebo dokud není změna hmotnosti menší než 0,5 mg.

Obsah popela v bezvodém stavu A^d je vypočítán jako hmotností zlomek vyjádřený v procentech.

$$A^d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M^{ad}} \quad (6.1)$$

m_1 ...hmotnost prázdného kelímku [g]

m_2 ...hmotnost kelímku se zkušebním podílem [g]

m_3 ...hmotnost kelímku s popelem [g]

M^{ad} ...obsah vody ve zkušebním podílu v analytickém stavu v %

Výsledek musí být zaznamenán na 2 desetinná místa a uvádí se průměrná hodnota z minimálně dvou stanovení s přesností na 0,1 %. [36]

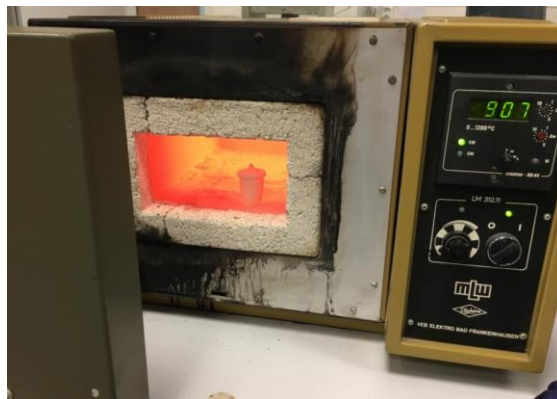
6.2 Stanovení obsahu prchavé hořlaviny tuhých biopaliv

Stanovení obsahu prchavé hořlaviny bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 18123 Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu prchavé hořlaviny.

Podstatou metody je zahřívání vzorku bez přístupu kyslíku při teplotě $900\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ po dobu 7 minut. Obsah prchavé hořlaviny je pak vypočítán z úbytku hmotnosti zkušebního podílu po odečtení obsahu vody.



Obr. 18 Muflová pec VEB elektro



Obr. 19 Vzorek při žhání v muflové peci

Postup stanovení začíná umístěním prázdných kelímků s víčky do stojanu. Stojan je potom přemístěn do rozpálené pece na teplotu $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, kde se nechá po dobu $7\text{ minut} \pm 5\text{ sekund}$. Po uplynutí doby žhání je stojan s kelímky vyjmut a nechá se chladnout na tepelně odolné desce a potom se uchovává v exsikátoru. Ochlazený prázdný kelímek s víčkem je zvážen s přesností na $0,1\text{ mg}$ a hmotnost je zaznamenána. Po přípravě kelímku je možné přijít k navážení $1\text{ g} \pm 0,1\text{ g}$ zkušební podílu z analytického vzorku. Zkušební podíl je nasypán do kelímku, pečlivě přiklopen víčkem a celý kelímek je poklepáván o tvrdý čistý povrch, aby materiál na jeho dně vytvořil rovnoměrnou vrstvu. Takto naplněný kelímek je vložen do stojanu a přenesen do rozpálené pece na teplotu $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po zavření dvířek pece je kelímek žhán po dobu $7\text{ minut} \pm 5\text{ sekund}$. Po uplynutí této doby je kelímek vyjmut a umístěn na tepelně odolnou desku, kde se nechá chladit 5 až 10 minut a potom umístěn do exsikátoru k dochlazení na laboratorní teplotu. Po úplném zchladnutí je kelímek zvážen s přesností na $0,1\text{ mg}$ a hmotnost je zaznamenána.

Obsah prchavé hořlaviny V^d v bezvodém zkušebním podílu je vypočítán jako hmotnostní zlomek vyjádřený v procentech.

$$V^d = \left(\frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M^{ad} \right) \cdot \left(\frac{100}{100 - M^{ad}} \right) \quad (6.2)$$

m_1 ...hmotnost prázdného kelímku a víčka [g]

m_2 ...hmotnost kelímku se zkušebním podílem a víčka před žháním [g]

m_3 ...hmotnost kelímku se zkušebním podílem a víčka po žhání [g]

M^{ad} ... obsah vody ve zkušebním podílu v analytickém stavu v %

Výsledek musí být zaznamenán na 2 desetinná místa a uvádí se průměrná hodnota z minimálně dvou stanovení s přesností na $0,1\text{ }%$. [37]

6.3 Stanovení obsahu vody tuhých biopaliv

Stanovení obsahu vody bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 18134-3 Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody.

Podstatou metody je sušení zkušební podílu při teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve vzduchové atmosféře do konstantní hmotnosti. Z úbytku hmotnosti zkušební podílu je pak vypočítán obsah vody vyjádřený v procentech.



Obr. 20 Sušárna ke stanovení
obsahu vody



Obr. 21 Vzorky paliv připravené k
sušení

Postup stanovení začíná vysušením prázdné váženky s víčkem v sušárně do konstantní hmotnosti při teplotě $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Po vysušení je váženka přemístěna do exsikátoru, kde se nechá ochladit na laboratorní teplotu. Ve stejnou dobu je možné sušit více váženek. Po ochlazení je váženka s víčkem zvážena s přesností na 0,1 mg a hmotnost zaznamenána. Nyní je do váženky rovnoměrně rozprostřen minimálně 1 g zkušebního podílu a naplněná váženka i s víčkem je zvážena s přesností na 0,1 mg a hmotnost zaznamenána. Váženka se zkušebním podílem je přenesena do sušárny, kde je sejmuto víčko a položeno vedle váženky a společně sušeno při teplotě $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ do konstantní hmotnosti. Jako konstantní hmotnost se rozumí, že změna hmotnosti během 60 minut sušení nepřesáhne 1 mg. Doba sušení zkušebního podílu závisí na velikosti částic materiálu, výměně vzduchu v sušárně a tloušťce vrstvy ve váženke. Je nutno počítat dobu sušení až 3 hodiny. Dále je důležité, aby doba sušení nepřesáhla 24 hodin, protože by mohlo dojít k nechtěným únikům těkavých složek paliva. Po ukončení sušení je nutné váženky ihned přiklopit víčkem a přenést do exsikátoru, kde se nechají ochladit na laboratorní teplotu. Po ochlazení je váženka se zkušebním podílem stále přiklopená víčkem a je co nejrychleji zvážena s přesností na 0,1 mg a hmotnost zaznamenána.

Obsah vody M^{ad} ve zkušebním vzorku v analytickém stavu je vypočítán jako hmotnostní zlomek vyjádřený v procentech.

$$M^{\text{ad}} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (6.3)$$

m_1 ...hmotnost prázdné váženky a víčka [g]

m_2 ...hmotnost váženky se zkušebním podílem a víčka před sušením [g]

m_3 ...hmotnost váženky se zkušebním podílem a víčka po sušení [g]

Výsledek musí být zaznamenán na 2 desetinná místa a uvádí se průměrná hodnota z minimálně dvou stanovení s přesností na 0,1 %. [38]

6.4 Stanovení spalného tepla a výpočet výhřevnosti tuhých biopaliv

Stanovení spalného tepla bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 18125 Tuhá biopaliva – Stanovení spalného tepla a výhřevnosti.

Podstatou měření spalného tepla je spálení vzorku tuhého biopaliva v kyslíku za vysokého tlaku v tlakové nádobě kalorimetru za předepsaných podmínek. Pro stanovení je nutné znát efektivní tepelnou kapacitu kalorimetru, která je stanovena kalibračními zkouškami spálením certifikovaného množství kyseliny benzoové. Opravený teplotní vzestup je získán měřením teploty před, během a po dokončení reakcí spalování. Četnost měření je závislá na typu kalorimetru. Na začátku je do tlakové nádoby přidána voda, aby vznikla fáze nasycených par pro absorpci celkové vody v kapalném stavu vzniklé z vodíku a vody obsažené ve vzorku. Vlastní hodnota spalného tepla je vypočítána z opraveného teplotního vzestupu a efektivní tepelné kapacity kalorimetru s přihlédnutím na podíly energie vzniklé při zapálení a spálení zapalovacího prostředku. Dále je brán ohled na tepelné účinky vedlejších reakcí, jako je vznik kyseliny sírové při reakci v tlakové nádobě a plynným oxidem siřičitým ze síry v biopalivu.



Obr. 22 Kalorimetr IKA C 200



Obr. 23 Tlaková láhev s čistým kyslíkem

Postup zkoušky začíná navážením 0,5 g zkušebního podílu do kelímku s přesností na 0,1 mg a hmotnost je zaznamenána. Kvůli své nízké hustotě jsou tuhá biopaliva lisována a zkoušena ve formě pelet. Nyní je nutné připravit tlakovou nádobu pro zkoušku. Zapalovací drátek je upevněn mezi elektrody tlakové nádoby a je k němu pevně přivázána bavlněná nit. Kelímek je umístěn do své objímky a bavlněná nit kontaktně spojena se zkušebním podílem. Na dno tlakové nádoby je nalit $1 \text{ ml} \pm 0,1 \text{ ml}$ destilované vody, aby byla zaručena kondenzace veškeré vody obsažené v palivu a produktech spalování. U některých biopaliv je nutné použít 5 ml vody pro úplnou absorpci produktů spalování. Nyní je tlaková nádoba sestavena a rukou dostatečně utáhnutá. Takto sestavená tlaková nádoba je vložena do kyslíkové plnicí stanice, kde je natlakována kyslíkem na tlak $3 \text{ MPa} \pm 0,2 \text{ MPa}$ bez vypouštění původního vzduchu nebo proplachováním kyslíkem po dobu 30 sekund a následným natlakováním na tlak $3 \text{ MPa} \pm 0,2 \text{ MPa}$. Před vložením tlakové nádoby do kalorimetru je nutné naplnit

kalorimetrickou nádobu vodou vytemperovanou na laboratorní teplotu $\pm 0,3$ K. Suchá a čistá tlaková nádoba je vložena do kalorimetru, který je následně zavřen a je spuštěn zvolený program. Po skončení programu kalorimetr sám vyhodnotí hodnotu spalného tepla Q_s v MJ/kg na základě tepla, které vzniklo při spalování.

Výhřevnost při konstantním objemu nebo při konstantním tlaku je zjištěna výpočtem z hodnoty spalného tepla analytického vzorku. Pro výpočet při konstantním objemu je potřeba znát hodnoty obsahu vody a vodíku, pro výpočet při konstantním tlaku zase hodnoty obsahu kyslíku a dusíku v analytickém vzorku.

Výpočet výhřevnosti je proveden z hodnoty spalného tepla. Z definice výhřevnosti plyne, že se jedná o spalné teplo zmenšené o hodnotu výparného tepla vody obsažené v palivu. Výhřevnost Q_i tuhého biopaliva v MJ/kg se určí z následující rovnice. [39]

$$Q_i = Q_s - 2,454 \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (6.4)$$

Q_i ...výhřevnost tuhého biopaliva [MJ/kg]

Q_s ...spalné teplo tuhého biopaliva [MJ/kg]

W^r ...relativní vlhkost tuhého biopaliva v původním stavu [-]

H_2 ...obsah vodíku v biopalivu [-]



Obr. 24 Rozložená tlaková nádoba
kalorimetru



Obr. 25 Plnicí kyslíková stanice

7 Výsledky a zhodnocení experimentální části

Cílem praktické části bakalářské práce bylo provést hrubý rozbor pro vybrané vzorky tuhých biopaliv. Měření probíhalo v palivové laboratoři energetického ústavu a bylo rozděleno na dvě části.

V první části měření byl proveden kompletní hrubý rozbor pro následující vzorky: světlice slupky, světlice pelety, lnička pelety, slunečnice pelety, katrán semena, quinoa lepší odpad 1, quinoa horší odpad 3.

Druhá část měření byla zaměřena pouze na jeden parametr hrubého rozboru, konkrétně na stanovení obsahu prchavé hořlaviny v následujících vzorcích: len odpad, hořčice semena, quinoa odpad 2, světlice zrno, lnička semena, žito zrno, amarant, seno pelety, sláma pelety.

Pro zaručení správnosti výsledků byla všechna měření pro každý vzorek zopakována třikrát. Výsledky jsou zaznamenány do tab. 1 na straně 32 a tab. 7 na straně 39 a pro přehlednost zobrazeny do grafů na obr. 33 až 37 a obr. 47.

7.1 Provedení hrubého rozboru

Rozbor byl prováděn podle výše popsaných postupů. Při stanovení obsahu vody a popela bylo možné provádět zkoušky pro více vzorků najednou, kde je omezením pouze kapacita sušárny nebo pece. U stanovení prchavé hořlaviny probíhala zkouška vždy jen pro jeden vzorek, přestože by to kapacita pece umožňovala. Manipulace s více vzorky současně by mohla způsobit nedodržení času zkoušky a naměření chybných hodnot. Zkouška spalného tepla byla prováděna v kalorimetru IKA C200, kde je možné najednou provádět stanovení pouze pro jeden vzorek.

Vzorky byly skladovány v uzavřených vzduchotěsných obalech při stejné relativní vlhkosti vzduchu v palivové laboratoři tak, aby nedošlo k ovlivnění vlastností paliv. Na přiložených obrázcích jsou zobrazeny tyto vzorky ve stavu, ve kterém byly podrobeny jednotlivým zkouškám.



Obr. 26 Katrán semena



Obr. 27 Lnička pelety



Obr. 28 Světlice slupky



Obr. 29 Slunečnice pelety



Obr. 30 Quinoa lepší odpad 1



Obr. 31 Quinoa horší odpad 3



Obr. 32 Světlice pelety

Palivo	Obsah vody [%]	Obsah popela [%]	Obsah prchavé hořlaviny [%]	Spalné teplo [MJ/kg]	Výhřevnost [MJ/kg]
Světlice slupky	5,49	2,97	83,43	21,98	20,27
Lnička pelety	7,10	11,31	79,72	20,94	19,14
Světlice pelety	7,08	4,01	80,10	20,04	18,36
Slunečnice pelety	6,09	6,04	80,78	22,32	20,42
Quinoa horší odpad 3	8,43	5,20	81,85	18,00	16,26
Quinoa lepší odpad 1	8,42	5,34	81,75	17,70	15,99
Katrán semena	5,49	6,16	83,40	25,35	23,40

Tab. 1 Výsledky hrubého rozboru zkoušených vzorků

Maximální obsah vody 8,42 % a 8,43 % byl měřením stanoven v quinoi bez rozdílu mezi vzorky lepšího a horšího odpadu. Naopak minimální obsah vody 5,49 % obsahují semena katrátu a světlice ve formě slupek a 6,09 % pelety slunečnice. S hodnotami obsahu vody úzce souvisí i vypočítaná výhřevnost, která byla maximální u semen katrátu 23,40 MJ/kg a naopak minimální u obou vzorků quinoi lepšího i horšího odpadu 15,99 a 16,26 MJ/kg. Zjištěný fakt potvrzuje předpoklad, že výhřevnost s rostoucím obsahem vody klesá.

Dalším důležitým faktem ovlivňujícím výhřevnost je obsah prchavé hořlaviny. Nejvyšší podíl prchavé hořlaviny byl naměřen u semen katrátu 83,40 % a světlice slupek 83,43 %.

Výpočet výhřevnosti byl proveden ze spalného tepla podle vzorce uvedeného v popisu metod v kapitole 6.4 na straně 29. Výhřevnost byla stanovena ve všech případech menší, čímž se potvrdila skutečnost, že výhřevnost je hodnota spalného tepla snižená o výparné teplo vody. Pro výpočet bylo potřeba znát procentuální obsah vodíku v palivech, který se zjistí na základě prvkové elementární analýzy. Protože experimentální část se prvkovou elementární analýzou nezabývala, byly použity hodnoty, převzaté od školitelky práce.

Maximální obsah popela 11,31 % byl zjištěn v peletách lničky. Výsledek se od průměrné hodnoty vzorků výrazně liší, asi o 6 %. Odchylka může být způsobena lisováním pelet příliš vysokým tlakem. Pelety vlivem špatného přístupu kyslíku nedokonale prohořívají, což se ve výsledku může projevit na vyšším obsahu popela. Nejmenší obsah popela byl naměřen u slupek světlice, konkrétně 2,97 %.

Zhodnocením všech výsledků hrubého rozboru lze ze sedmi zkoušených vzorků vybrat energeticky nejlépe využitelné palivo. Nejdůležitějšími požadavky na takové palivo je vysoká výhřevnost, velký podíl prchavé hořlaviny, nízký obsah vody a popela. Uvedené požadavky nejlépe splňují vzorky katrátu, pelet slunečnice a slupek světlice. Naopak méně vhodnými palivy se jeví oba vzorky quinoi a pelety lničky.

Na následujících stranách 33 až 37 je uveden podrobný postup výpočtu pro vzorek 1 slupek světlice. Výpočty pro ostatní vzorky paliv byly provedeny obdobě pro hodnoty z tabulky výsledků hrubého rozboru uvedené v příloze na straně 51 až 53.

Obsah vody v palivu

Stanovení obsahu vody bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 18134-3, viz kapitola 6.3.

- Tabulka naměřených hodnot a výsledků

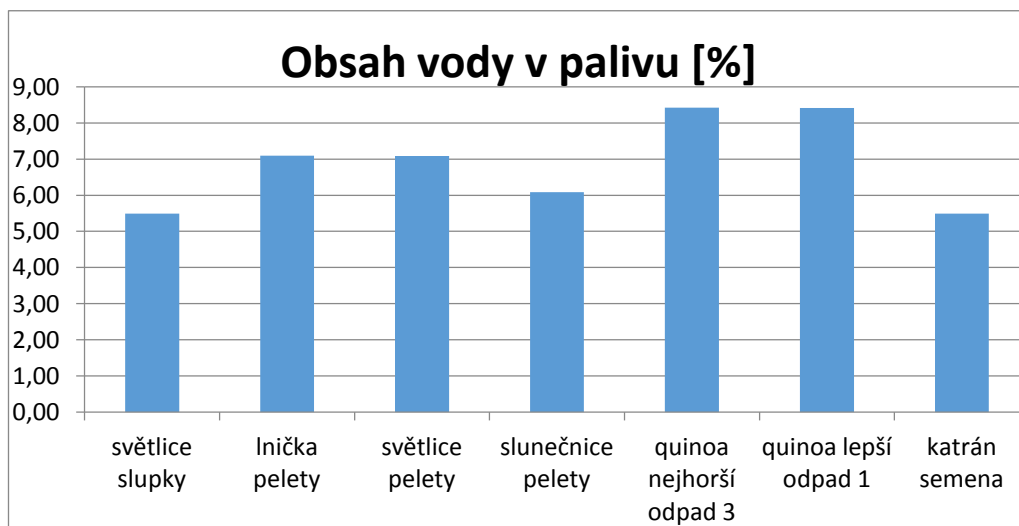
	světlice slupky		
STANOVENÍ OBSAHU VODY	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
hmotnost kelímku a víčka [g]	26,9413	27,4765	27,8885
hmotnost vzorku [g]	1,0362	1,0077	1,0256
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	27,9775	28,4842	28,9141
hmotnost po vysušení [g]	27,9206	28,4307	28,8559
úbytek hmotnosti vzorku [g]	0,0569	0,0535	0,0582
obsah vody ve vzorku [%]	5,49	5,31	5,67
obsah vody v palivu [%]	5,49		

Tab. 2 Naměřené hodnoty a výsledky stanovení obsahu vody

- Příklad výpočtu podle rovnice 6.3 pro vzorek 1

$$M^{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 = \frac{(27,9775 - 27,9206)}{(27,9775 - 26,9413)} \cdot 100 = 5,49 \% \quad (7.1)$$

- Grafické znázornění obsahu vody



Obr. 33 Graf obsahu vody v palivech

Spalné teplo a výpočet výhřevnosti

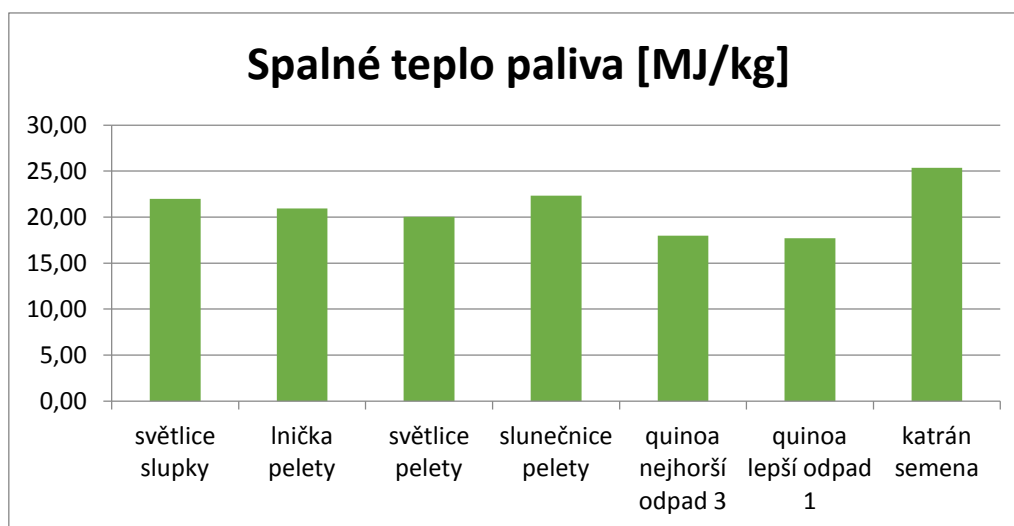
Spalné teplo bylo určeno pomocí kalorimetru podle normy ČSN EN ISO 18125, viz kapitola 6.4.

- Tabulka naměřených hodnot spalného tepla

	světlice slupky		
STANOVENÍ SPALNÉHO TEPLA	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
hmotnost vzorku [g]	0,5061	0,5271	0,5001
spalné teplo vzorku [MJ/kg]	20,59	22,96	22,40
spalné teplo paliva [MJ/kg]	21,98		

Tab. 3 Naměřené hodnoty spalného tepla

- Grafické znázornění hodnot spalného tepla



Obr. 34 Graf hodnot spalného tepla

- Příklad výpočtu výhřevnosti podle rovnice 6.4 pro vzorek 1

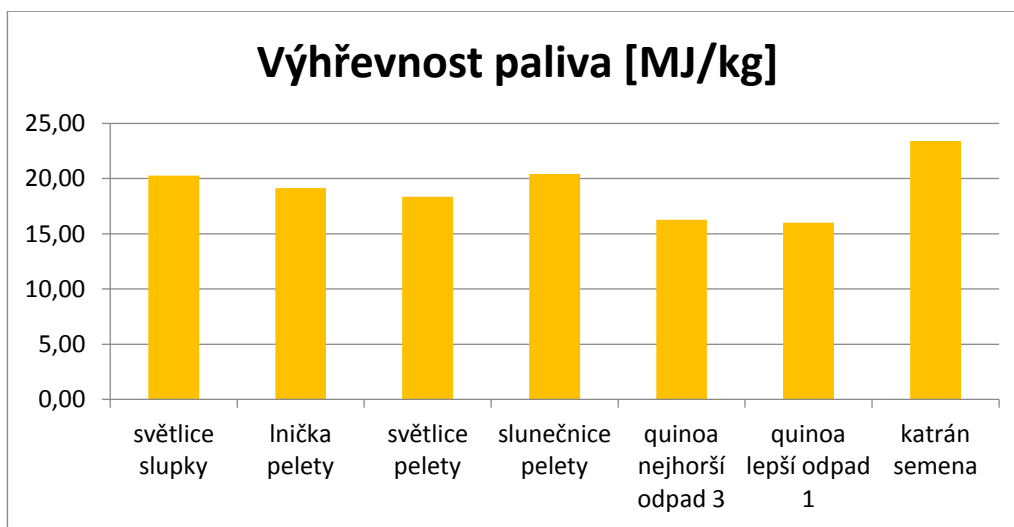
$$Q_i = Q_s - 2,454 \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) = 20,59 - 2,454 \cdot \left(\frac{5,49}{100} + 8,94 \cdot \frac{7,1928}{100} \right) = 18,87 \text{ MJ/kg} \quad (7.2)$$

- Výsledná výhřevnost vypočítaná pro slupky světlice

	světlice slupky		
VÝPOČET VÝHŘEVNOSTI	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
obsah vodíku paliva [%]	7,1928	7,1928	7,1928
výhřevnost vzorku [MJ/kg]	18,87	21,25	20,68
výhřevnost paliva [MJ/kg]	20,27		

Tab. 4 Výsledky výpočtu výhřevnosti

- Grafické znázornění vypočítané výhřevnosti



Obr. 35 Graf hodnot výhřevnosti paliv

Obsah popela v palivu

Stanovení obsahu popela bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 18122, viz kapitola 6.1.

- Tabulka naměřených hodnot a výsledků

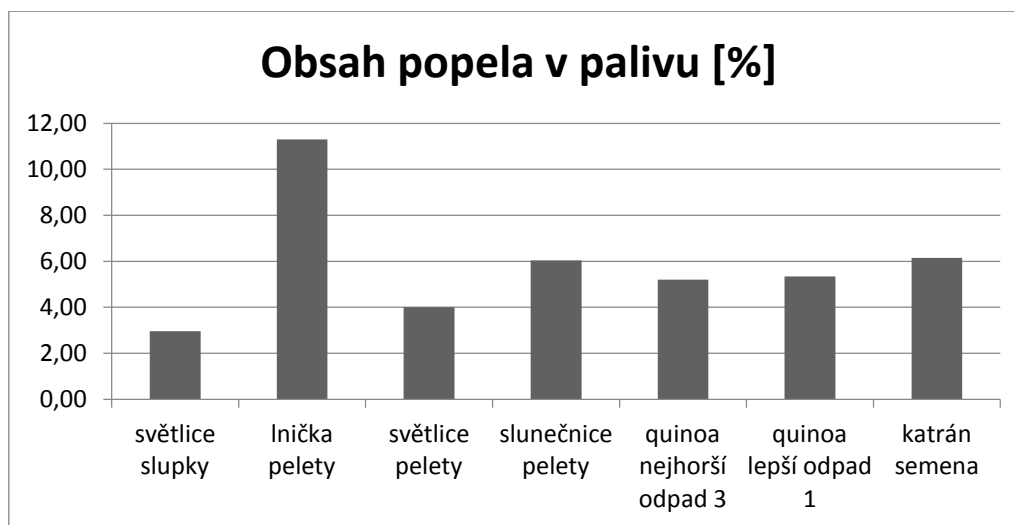
	světlice slupky		
STANOVENÍ OBSAHU POPELA	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
hmotnost kelímku [g]	46,8249	43,6382	48,0741
hmotnost kelímku a vzorku [g]	54,7903	52,9437	56,3886
hmotnost vzorku [g]	7,9654	9,3055	8,3145
hmotnost po spálení [g]	47,0368	43,9214	48,2997
obsah popela ve vzorku [%]	2,81	3,21	2,88
obsah popela v palivu [%]	2,97		

Tab. 5 Naměřené hodnoty a výsledky stanovení obsahu popela

- Příklad výpočtu obsahu popela ve vzorku 1 podle rovnice 6.1

$$\begin{aligned}
 A^d &= \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M^{ad}} \\
 &= \frac{(47,0368 - 46,8249)}{(54,7903 - 46,8249)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - 5,49} = 2,81 \% \quad (7.3)
 \end{aligned}$$

- Grafické znázornění obsahu popela



Obr. 36 Graf obsahu popela v palivech

Obsah prchavé hořlaviny

Stanovení obsahu prchavé hořlaviny bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 18123, viz kapitola 6.2.

- Tabulka naměřených hodnot a výsledků

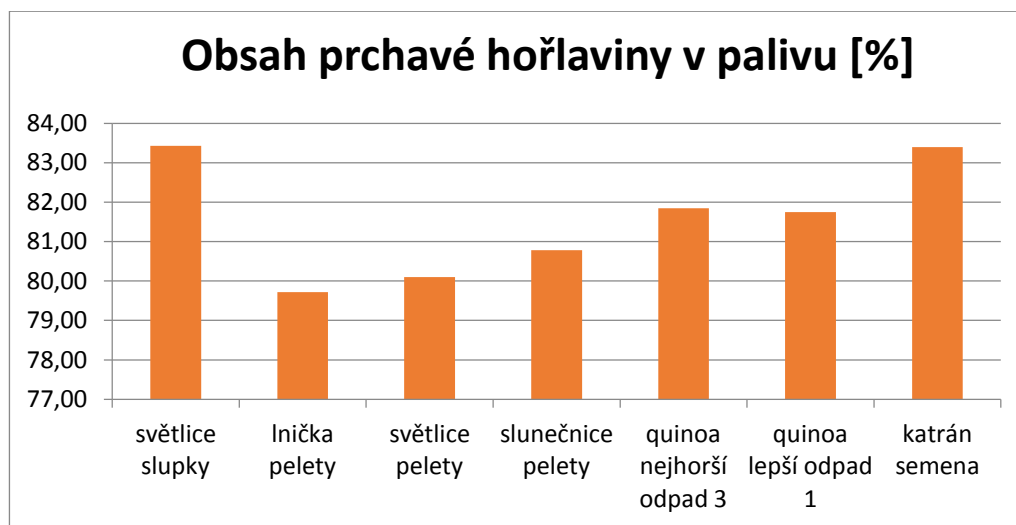
	světlice slupky		
STANOVENÍ OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
hmotnost kelímku a víčka [g]	20,6579	22,1869	20,3734
hmotnost vzorku [g]	1,0704	1,0507	1,0097
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	21,7283	23,2376	21,3831
hmotnost kelímku, víčka a vzorku po žihání [g]	20,8223	22,3506	20,5355
obsah prchavé hořlaviny v bezvodém vzorku [%]	83,75	83,55	82,98
obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]	83,43		

Tab. 6 Naměřené hodnoty a výsledky stanovení prchavé hořlaviny

- Příklad výpočtu obsahu prchavé hořlaviny vzorku 1 podle rovnice 6.2

$$\begin{aligned}
 V^d &= \left(\frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M^{ad} \right) \cdot \left(\frac{100}{100 - M^{ad}} \right) \\
 &= \left(\frac{100 \cdot (21,7283 - 20,8223)}{21,7283 - 20,6579} - 5,49 \right) \cdot \left(\frac{100}{100 - 5,49} \right) = 83,75 \%
 \end{aligned}
 \tag{7.4}$$

- Grafické znázornění obsahu prchavé hořlaviny



Obr. 37 Graf obsahu prchavé hořlaviny v palivech

7.2 Stanovení obsahu prchavé hořlaviny

Na přiložených obrázcích jsou zachyceny vzorky ve stavu, ve kterém se provádělo stanovení obsahu prchavé hořlaviny.



Obr. 38 Len odpad



Obr. 39 Lnička semena



Obr. 40 Světlice zrna



Obr. 41 Quinoa odpad 2



Obr. 42 Hořčice semena



Obr. 43 Žito zrna



Obr. 44 Sláma pelety



Obr. 45 Seno pelety



Obr. 46 Amarant

Palivo	Obsah prchavé hořlaviny [%]
Len odpad	77,52
Hořčice semena	83,28
Quinoa odpad 2	76,06
Světlice zrno	85,11
Lnička semena	86,15
Žito zrno	84,28
Amarant	79,29
Seno pelety	72,85
Sláma pelety	77,97

Tab. 7 Výsledky stanovení prchavé hořlaviny zkoušených vzorků

Nejlepších výsledků v této zkoušce dosáhly čtyři vzorky s obsahem prchavé hořlaviny nad 80 %. Jedná se o semena lničky 86,15 %, zrno světlice 85,11 %, žito 84,28 % a semena hořčice 83,28 %. Z tohoto pohledu se tato paliva jeví jako vhodné suroviny k produkci alternativních paliv.

Srovnáním výsledků prchavé hořlaviny z hrubého rozboru výše a tohoto stanovení je možné vidět, že na obsah prchavé hořlaviny má vliv i forma paliva. Rozdíl je vidět u vzorků lničky a světlice. Lnička byla zkoušena ve dvou podobách a to jako pelety a semena. Lepšího výsledku dosahují surová semena a to o 6,43 %. Rozdílných výsledků dosahovaly i vzorky

světlice zkoušené jako pelety, zrna a slupky. Zde se jako nejvýhodnější jeví zrna s nejvyšším obsahem prchavé hořlaviny 85,11 %, dále slupky se 83,43 % a nejmenšího výsledku dosáhly pelety s 80,10 %.

Níže je uveden podrobný výpočet obsahu prchavé hořlaviny pro vzorek 1 odpadu lnu.

- Tabulka naměřených a výsledků

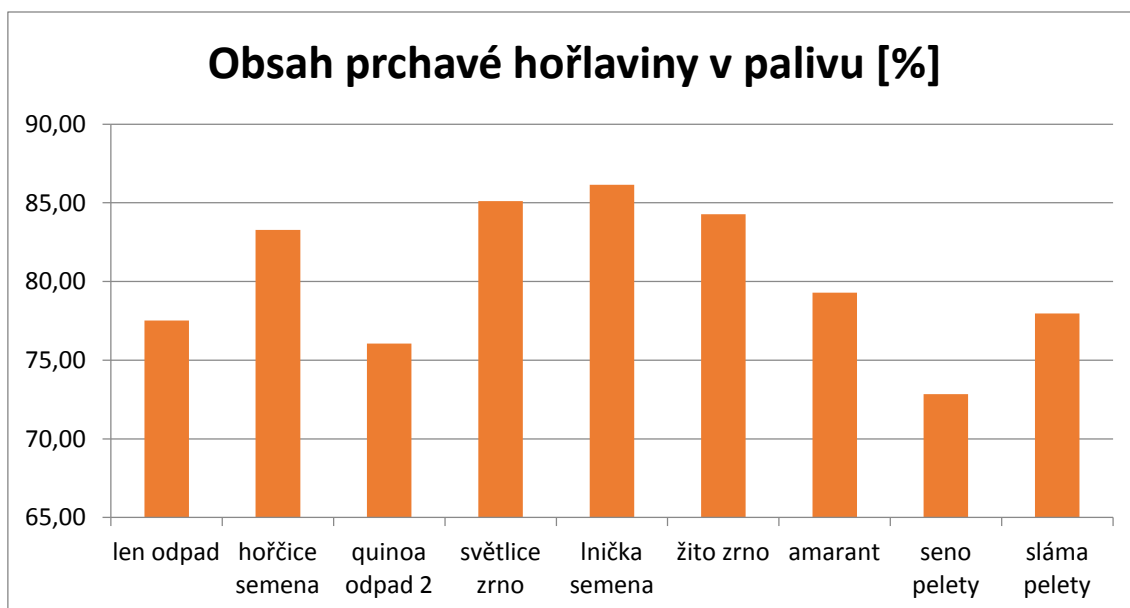
STANOVENÍ OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY	len odpad		
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
osah vody ve vzorku [%]	5,42		
hmotnost Kelímku a víčka [g]	22,5966	23,0271	19,4869
hmotnost vzorku [g]	1,0237	1,1074	1,0209
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	23,6203	24,1345	20,5078
hmotnost kelímku, víčka a vzorku po žihání [g]	22,8237	23,2724	19,7099
obsah prchavé hořlaviny v bezvodém vzorku [%]	76,54	77,85	78,16
obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]	77,52		

Tab. 8 Naměřené hodnoty a výsledky stanovení prchavé hořlaviny

- Příklad výpočtu prchavé hořlaviny vzorku 1 podle rovnice 6.2

$$\begin{aligned}
 V^d &= \left(\frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M^{ad} \right) \cdot \left(\frac{100}{100 - M^{ad}} \right) \\
 &= \left(\frac{100 \cdot (23,6203 - 22,8237)}{23,6203 - 22,5966} - 5,42 \right) \cdot \left(\frac{100}{100 - 5,42} \right) = 76,54 \%
 \end{aligned}
 \tag{7.5}$$

- Grafické znázornění obsahu prchavé hořlaviny



Obr. 47 Graf obsahu prchavé hořlaviny v palivech

ZÁVĚR

Cílem teoretické části bakalářské práce bylo provést rešerši, zabývající se současnými trendy ve využívání obnovitelných zdrojů energie, vlastnostmi tuhých paliv a popisem hrubého rozboru. V navazující praktické části byly jednotlivé metody hrubého rozboru popsány a experimentálně odzkoušeny v praxi. Získané výsledky byly následně zpracovány do tabulek a grafů a vyhodnoceny. Bakalářská práce je strukturována do tří navazujících částí.

Úvodní část se věnuje vývoji využívaných zdrojů energie. Biomasu jako obnovitelný zdroj využíval člověk po celou dobu své existence ve formě dřeva. Dominance fosilních paliv jako zdroje energie je vidět až v posledních několika stoletích. Hojné využívání uhlí, ropy a zemního plynu nastalo teprve s příchodem průmyslové revoluce. Tato paliva mají ovšem negativní vliv na životní prostředí, a proto je snahou současné energetiky je nahrazovat alternativními zdroji. Do popředí se díky tomu dostává využití odpadů a alternativní biomasy. Práce s takovými palivy však bývá díky jejich proměnlivému složení mnohdy složitá a z tohoto důvodu je nutné je co nej přesněji popsat. Pro popis paliv se používá, díky své snadné proveditelnosti tzv. hrubý rozbor.

Další část práce se zabývá samotným hrubým rozbořem a významem jeho provádění. V praktické části jsou také popsány vlastnosti tuhých paliv, které jsou pro jejich efektivní využití z energetického hlediska důležité. Mezi tyto vlastnosti patří výhřevnost, obsah vody, popela a hořlaviny.

Závěrečná část podrobně popisuje metody hrubého rozboru – stanovení obsahu vody, popela, prchavé hořlaviny a určení spalného tepla včetně výpočtu výhřevnosti. Jednotlivé metody byly ověřeny experimentem. Pro sedm vzorků alternativní a odpadní biomasy byl proveden kompletní hrubý rozbor a pro devět vzorků stanovení prchavé hořlaviny. Důležitou vlastnost paliva u hrubého rozboru představuje výhřevnost, která je často uváděna jako základní charakteristika paliva, protože je ovlivněna obsahem vody, popela i hořlaviny. Nejlepšího výsledku zde dosáhl vzorek semen ktránu s maximální výhřevností 23,40 MJ/kg. Ale i ostatní vzorky je možné považovat za vhodné pro energetické využití, ovšem s nižší efektivitou. Získané hodnoty potvrdily teoretické předpoklady. Jednotlivé hodnoty se u vzorků téhož paliva lišily pouze v řádu desetin procent a z toho vyplývá, že použité metody jsou vhodné k provedení hrubého rozboru tuhých biopaliv.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Biomass energy. *National Geographic Society* [online]. b.r. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/biomass-energy/>
- [2] BASU, Prabir. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Chapter 3 - Biomass Characteristics*. 2018, , 49-91. DOI: 10.1016/B978-0-12-812992-0.00003-0.
- [3] SINDHU, Raveendran. Biofuel Production From Biomass: Toward Sustainable Development. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. 2019, , 80-92.
- [4] ÖZYUGURAN, Ayse a Serdar YAMAN. *Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis: Energy Procedia 107*. 2017, , 130-136. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.12.149.
- [5] MCKENDRY, Peter. *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass: Bioresource Technology 83*. 2002, , 37-46. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.
- [6] CIOLKOSZ, Daniel. *Characteristics of Biomass as a Heating Fuel* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-05-19].
- [7] Spotřeba energie a vývoj společnosti. *Vítejte na Zemi* [online]. Praha: CENIA, česká informační agentura životního prostředí, 2013, s. 1 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=spotreba_energie_a_vyvoj_spolecnosti&site=energie
- [8] Energie v našem životě. *Vítejte na Zemi* [online]. 2013 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=energie_v_nasem_zivote&site=energie
- [9] HANANIA, Jordan. Fuel: Types of fuel. *Education Energy* [online]. b.r. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Fuel>
- [10] KUMAR, Sunil a Snehalata ANKARAM. Waste-to-Energy Model/Tool Presentation. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. 2019, , 239-258.
- [11] *Obnovitelné zdroje energie (struktura a predikce jejich rozvoje, Česká republika, Evropská unie, legislativa)* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/12_theorie.html
- [12] Palivo. *Wikipedie* [online]. San Francisco: Wikipedie, 2007 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Palivo>
- [13] WICHTERLE, Kamil a Ivan KOUTNÍK. *Technologie a analýza paliv*. 1. vydání. Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3344-6.
- [14] UTĚŠIL, Tomislav. Závislost výhřevnosti paliva na obsahu vody. In: *Biom.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/obrazek/zavislost-vyhrevnosti-paliva-na-obsahu-vody>
- [15] SOUČEK, Jiří. Logistika při energetickém využití rostlinné biomasy. *Biom.cz* [online].

- 2011 [cit. 2019-05-18]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/logistika-pri-energetickem-vyuziti-rostlinne-biomasy>
- [16] Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. In: *O energetice* [online]. Třebíč: oenergetice.cz, 2017 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [17] BECHNÍK, Bronislav. Biomasa: definice a členění. *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/5641-biomasa-definice-a-cleneni>
- [18] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [19] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC PUBLIC, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [20] Biomasa a její využití. *Deník veřejné správy* [online]. b.r. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.dvs.cz/clanek.asp?id=6325377>
- [21] Kogenerace. *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace>
- [22] *Pracovní seznam energetických rostlin (plodin)* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.vukoz.cz/index.php/energeticke-plodiny/pracovni-seznam-e-plodin>
- [23] PETŘÍKOVÁ, Vlasta. Polní energetické plodiny. *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/17440-polni-energeticke-plodiny>
- [24] ČVANČARA, František. *Zemědělská výroba v číslech, díl první*. Praha: SZN - Státní zemědělské nakladatelství Praha, 1962.
- [25] STRAŠIL, Zdeněk. *Základy pěstování a možnosti využití lničky seté*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, 2008. ISBN 978-80-87011-75-1.
- [26] *Technické plodiny a průmyslové využití biomasy: Alternativní olejniny* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/skripta/3/index.html>
- [27] *Alternativní, maloobjemové, potravinářské plodiny: Laskavec (Amaranthus L.)* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/skripta/2/>
- [28] *ŽITO SETÉ (Secale cereale L.)* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/vegetabilie/plodiny/czech/zito.htm>
- [29] Hořčice polní. *Agromanual.cz* [online]. České Budějovice, b.r. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/atlas/plevele/plevel/horcice-polni>
- [30] SLUNEČNICE ROČNÍ. *Zemědělské komodity* [online]. b.r. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.zemedelskekomodity.cz/index.php/rostlinna-vyroba-menu/olejniny/slunecnice>
- [31] KOLÁŘOVÁ, Marcela. Tuhé alternativní palivo s biomasou. *Biom.cz* [online]. Praha,

- b.r. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/tuhe-alternativni-palivo-s-biomasou>
- [32] STUPAVSKÝ, Vladimír. Dřevní pelety a brikety. In: *TZB info* [online]. b.r. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vytapeni/11997-nove-normy-pro-tuha-biopaliva-jiz-v-platnosti>
- [33] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. *Kotle – 1. část* [online]. b.r. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [34] LYČKA, Zdeněk. Dřevo jako garanční palivo: Není vlhkost jako vlhkost. *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/18368-pohledem-znalce-drevo-jako-garancni-palivo-i-vlhkost-25-je-v-poradku>
- [35] *Úvod do teorie spalování tuhých paliv* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/194-spalovani-tuhych-paliv-1.pdf>
- [36] ČSN EN ISO 18122 (838210). *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu popela*. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. ISBN 8596135001248.
- [37] ČSN EN ISO 18123 (838222). *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu prchavé hořlaviny*. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. ISBN 8596135001293.
- [38] ČSN EN ISO 18134-3 (838220). *Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu vody – Metoda sušení v sušárně – Část 3: Obsah vody v analytickém vzorku pro obecný rozbor*. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. ISBN 8590963993416.
- [39] ČSN EN ISO 18125 (838214). *Tuhá biopaliva - Stanovení spalného tepla a výhřevnosti*. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019. ISBN 8596135069316.
- [40] Lnička setá. In: *MODERNÍ VČELÁŘ* [online]. 2018 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.modernivcelar.eu/clanky/polni-novinka-prospesna-vcelam.html>
- [41] DOHNAL, Josef. Len setý. In: *Botanická fotogalerie* [online]. b.r. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: http://www.botanickafotogalerie.cz/fotogalerie.php?lng=cz&latName=Linum%20usitatissimum&plant_part=10&title=Linum%20usitatissimum%20%7C%20len%20set%C3%BD
- [42] Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz 1885: Světlice barvířská. In: *Wikipedie* [online]. b.r. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Illustration_Carthamus_tinctoriuss0.jpg
- [43] *Krambeöl* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z:

<https://www.cosmacon.de/krambeoel/>

- [44] Laskavec. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Laskavec#/media/File:Illustration_Amaranthus_retroflexus0.jpg
- [45] *Žito* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://wiki.rvp.cz/Kabinet/Obrazky/P%C5%99%C3%ADroda/Obiloviny/%C5%BDito>
- [46] Fotka: hořčice rolní. In: *Atlas Rostlin* [online]. b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: http://im.atlasrostlin.cz/horcice-rolni/570/5701-gallery_main-fymkc.png
- [47] Iconographia plantarum: *Helianthus annuus* L. In: *BOTANY.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://botany.cz/cs/iconographia-helianthus-annuus/>
- [48] Laboratorní komorová pec. In: *LAC* [online]. b.r. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/laboratorni-komorova-pec-l>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
h	Obsah hořlaviny	%
A^r	Obsah popeloviny v surovém stavu	%
W^r	Relativní vlhkost paliva v surovém stavu	%
Q_s	Spalné teplo	MJ/kg
Q_i	Výhřevnost	MJ/kg
A^d	Obsah popela v bezvodém stavu	%
m_1	Hmotnost prázdného kelímku	g
m_2	Hmotnost kelímku se zkušebním podílem	g
m_3	Hmotnost kelímku s popelem	g
M^{ad}	Obsah vody ve zkušebním podílu v analytickém stavu	%
m_1	Hmotnost prázdné váženky a víčka	g
m_2	Hmotnost váženky se zkušebním podílem a víčka před sušením	g
m_3	Hmotnost váženky se zkušebním podílem a víčka po sušení	g
V^d	Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu	%
m_1	Hmotnost prázdného kelímku a víčka	g
m_2	Hmotnost kelímku se zkušebním podílem a víčka před žiháním	g
m_3	Hmotnost kelímku se zkušebním podílem a víčka po žihání	g
H_2	Obsah vodíku v palivu	%

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Graf vývoje spotřeby obnovitelných zdrojů energie [11]	13
Obr. 2 Graf závislosti výhřevnosti na obsahu vody v palivu [14]	14
Obr. 3 Výhody a nevýhody spojené s využíváním biomasy [16]	16
Obr. 4 Lnička setá [40]	18
Obr. 5 Len setý [41]	18
Obr. 6 Světlice barvířská [42]	19
Obr. 7 Kramble habešská [43]	19
Obr. 8 Laskavec [44]	20
Obr. 9 Žito seté [45]	20
Obr. 10 Hořčice [46]	20
Obr. 11 Slunečnice roční [47]	20
Obr. 12 Brikety a pelety [32]	21
Obr. 13 Tabulka hrubého rozboru tuhých paliv, platná i pro biomasu [33]	22
Obr. 14 Komorová laboratorní pec [48]	24
Obr. 15 Vzorky připravené v peci ke slápení	24
Obr. 16 Exsikátor k uchovávání vzorků a kelímků	24
Obr. 17 Analytické laboratorní váhy	24
Obr. 18 Muflová pec VEB elektro	26
Obr. 19 Vzorek při žhání v muflové peci	26
Obr. 20 Sušárna ke stanovení obsahu vody	27
Obr. 21 Vzorky paliv připravené k sušení	27
Obr. 22 Kalorimetr IKA C 200	28
Obr. 23 Tlaková láhev s čistým kyslíkem	28
Obr. 24 Rozložená tlaková nádoba kalorimetru	29
Obr. 25 Plnicí kyslíková stanice	29
Obr. 26 Katrán semena	30
Obr. 27 Lnička pelety	30
Obr. 28 Světlice slupky	31
Obr. 29 Slunečnice pelety	31
Obr. 30 Quinoa lepší odpad 1	31
Obr. 31 Quinoa horší odpad 3	31
Obr. 32 Světlice pelety	31
Obr. 33 Graf obsahu vody v palivech	33
Obr. 34 Graf hodnot spalného tepla paliv	34
Obr. 35 Graf hodnot výhřevnosti paliv	35
Obr. 36 Graf obsahu popela v palivech	36
Obr. 37 Graf obsahu prchavé hořlaviny v palivech	37
Obr. 38 Len odpad	37
Obr. 39 Lnička semena	37
Obr. 40 Světlice zrno	38
Obr. 41 Quinoa odpad 2	38
Obr. 42 Hořčice semena	38

Obr. 43 Žito zrno	38
Obr. 44 Sláma pelety	38
Obr. 45 Seno pelety	38
Obr. 46 Amarant	39
Obr. 47 Graf obsahu prchavé hořlaviny v palivech	40

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Výsledky hrubého rozboru zkoušených vzorků	32
Tab. 2 Naměřené hodnoty a výsledky stanovení obsahu vody	33
Tab. 3 Naměřené hodnoty spalného tepla	34
Tab. 4 Výsledky výpočtu výhřevnosti	34
Tab. 5 Naměřené hodnoty a výsledky stanovení obsahu popela	35
Tab. 6 Naměřené hodnoty a výsledky stanovení prchavé hořlaviny	36
Tab. 7 Výsledky stanovení prchavé hořlaviny zkoušených vzorků	39
Tab. 8 Naměřené hodnoty a výsledky stanovení prchavé hořlaviny	40

SEZNAM PŘÍLOH

1	Tabulky výsledků z průběhu hrubého rozboru	51-53
2	Tabulka výsledků z průběhu stanovení prchavé hořlaviny	54

	světlice slupky			lnička pelety			světlice pelety		
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
STANOVENÍ OBSAHU VODY									
hmotnost kelímku a víčka [g]	26,9413	27,4765	27,8885	22,7027	27,2939	27,4126	28,1742	28,6364	27,0778
hmotnost vzorku [g]	1,0362	1,0077	1,0256	1,0381	1,0538	0,9979	1,0698	1,0301	1,01
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	27,9775	28,4842	28,9141	23,7408	28,3477	28,4105	29,244	29,6665	28,0878
hmotnost po vysušení [g]	27,9206	28,4307	28,8559	23,6688	28,2711	28,3398	29,1683	29,592	28,0177
úbytek hmotnosti vzorku [g]	0,0569	0,0535	0,0582	0,072	0,0766	0,0707	0,0757	0,0745	0,0701
obsah vody ve vzorku [%]	5,4912	5,31	5,67	6,94	7,27	7,08	7,08	7,23	6,94
obsah vody v palivu [%]	5,49			7,10			7,08		
STANOVENÍ OBSAHU POPELA									
hmotnost kelímku [g]	46,8249	43,6382	48,0741	45,5504	55,4791	43,2583	44,1089	43,8267	44,0014
hmotnost kelímku a vzorku [g]	54,7903	52,9437	56,3886	54,9166	64,1821	51,6613	59,2957	60,5415	59,8121
hmotnost vzorku [g]	7,9654	9,3055	8,3145	9,3662	8,703	8,403	15,1868	16,7148	15,8107
hmotnost po spálení [g]	47,0368	43,9214	48,2997	46,6126	56,3592	44,1035	44,6894	44,4359	44,5876
obsah popela ve vzorku [%]	2,81	3,21	2,88	12,19	10,91	10,83	4,11	3,93	3,98
obsah popela v palivu [%]	2,97			11,31			4,01		
STANOVENÍ SPALNÉHO TEPLA									
hmotnost vzorku [g]	0,5061	0,5271	0,5001	0,5409	0,4979	0,5753	0,5334	0,4631	0,4544
spalné teplo vzorku [MJ/kg]	20,59	22,96	22,40	20,94	20,90	20,99	20,12	19,87	20,13
spalné teplo paliva [MJ/kg]	21,98			20,94			20,04		
STANOVENÍ OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY									
hmotnost kelímku a víčka [g]	20,6579	22,1869	20,3734	20,3373	20,3998	20,6955	20,3858	22,4851	21,7261
hmotnost vzorku [g]	1,0704	1,0507	1,0097	0,9974	1,0416	1,0904	1,021	1,0051	0,9994
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	21,7283	23,2376	21,3831	21,3347	21,4414	21,7859	21,4068	23,4902	22,7255
hmotnost kelímku, víčka a vzorku po žhání [g]	20,8223	22,3506	20,5355	20,5243	20,5951	20,903	20,5728	22,6722	21,9114
obsah prchavé hořlaviny v bezvodém vzorku [%]	79,15	79,11	78,27	74,32	73,98	73,89	74,61	74,15	74,52
obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]	78,84			74,06			74,43		
VÝPOČET VÝHŘEVNOSTI									
obsah vodíku paliva [%]	7,1928	7,1928	7,1928	7,4055	7,4055	7,4055	6,8725	6,8725	6,8725
výhřevnost vzorku [MJ/kg]	18,87	21,25	20,68	19,14	19,10	19,19	18,43	18,19	18,46
výhřevnost paliva [MJ/kg]	20,27			19,14			18,36		

	slunečnice pelety			quinoa nejhorší odpad 3			quinoa lepší odpad 1		
STANOVENÍ OBSAHU VODY	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
hmotnost kelímku a víčka [g]	18,3757	18,6463	18,6996	18,8738	18,6815	18,3321	18,0268	18,1711	19,1063
hmotnost vzorku [g]	1,099	1,0293	1,0566	1,007	1,0097	1,0172	1,0131	1,0229	1,0044
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	19,4747	19,6756	19,7562	19,8808	19,6912	19,3493	19,0399	19,194	20,1107
hmotnost po vysušení [g]	19,4074	19,6114	19,6938	19,7964	19,6059	19,2633	18,9557	19,1059	20,0271
úbytek hmotnosti vzorku [g]	0,0673	0,0642	0,0624	0,0844	0,0853	0,086	0,0842	0,0881	0,0836
obsah vody ve vzorku [%]	6,12	6,24	5,91	8,38	8,45	8,45	8,31	8,61	8,32
obsah vody v palivu [%]	6,09			8,43			8,42		
STANOVENÍ OBSAHU POPELA									
hmotnost kelímku [g]	44,3442	47,5901	44,9411	49,6578	59,615	47,9149	54,2641	48,4225	40,4173
hmotnost kelímku a vzorku [g]	60,8212	63,1546	61,5951	56,4017	67,2999	55,1934	62,6762	55,9192	48,7176
hmotnost vzorku [g]	16,477	15,5645	16,654	6,7439	7,6849	7,2785	8,4121	7,4967	8,3003
hmotnost po spálení [g]	45,3022	48,4491	45,8884	49,9642	59,9804	48,2776	54,6614	48,7853	40,8414
obsah popela ve vzorku [%]	6,19	5,89	6,05	4,96	5,19	5,44	5,15	5,30	5,57
obsah popela v palivu [%]	6,04			5,20			5,34		
STANOVENÍ SPALNÉHO TEPLA									
hmotnost vzorku [g]	0,4811	0,5142	0,5172	0,4585	0,4633	0,5176	0,5985	0,4667	0,6619
spalné teplo vzorku [MJ/kg]	22,07	22,34	22,56	17,99	17,80	18,21	17,62	17,76	17,72
spalné teplo paliva [MJ/kg]	22,32			18,00			17,70		
STANOVENÍ OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY									
hmotnost kelímku a víčka [g]	20,3237	22,1565	22,3069	22,9041	20,7394	19,3487	20,8535	22,4295	20,3663
hmotnost vzorku [g]	1,0286	1,0455	1,0198	1,0148	1,0097	1,0187	1,0346	1,1138	1,0705
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	21,3523	23,202	23,3267	23,9189	21,7491	20,3674	21,8881	23,5433	21,4368
hmotnost kelímku, víčka a vzorku po zžhání [g]	20,5066	22,3465	22,4924	23,0743	20,9036	19,5202	21,0271	22,6186	20,5417
obsah prchavé hořlaviny v bezvodém vzorku [%]	81,06	80,62	80,67	81,69	82,24	81,61	81,70	81,42	82,13
obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]	80,78			81,85			81,75		
VÝPOČET VÝHŘEVNOSTI									
obsah vodíku paliva [%]	7,9737	7,9737	7,9737	6,962	6,962	6,962	6,8432	6,8432	6,8432
výhřevnost vzorku [MJ/kg]	20,17	20,43	20,66	16,25	16,07	16,47	15,91	16,05	16,02
výhřevnost paliva [MJ/kg]	20,42			16,26			15,99		

	katrán semena				
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3		
STANOVENÍ OBSAHU VODY	hmotnost Kelímku a víčka [g]	16,9204	19,2836	19,0601	
	hmotnost vzorku [g]	1,0123	1,0117	1,0253	
	hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	17,9327	20,2953	20,0854	
	hmotnost po vysušení [g]	17,8766	20,2397	20,0296	
	úbytek hmotnosti vzorku [g]	0,0561	0,0556	0,0558	
	obsah vody ve vzorku [%]	5,54	5,50	5,44	
	obsah vody v palivu [%]	5,49			
	STANOVENÍ OBSAHU POPELA	hmotnost kelímku [g]	45,31	41,8639	44,3492
		hmotnost kelímku a vzorku [g]	51,5708	47,9058	51,1038
		hmotnost vzorku [g]	6,2608	6,0419	6,7546
hmotnost po spálení [g]		45,6741	42,2031	44,756	
obsah popela ve vzorku [%]		6,16	5,94	6,37	
obsah popela v palivu [%]		6,16			
STANOVENÍ SPALNÉHO TEPLA	hmotnost vzorku [g]	0,5762	0,5861	0,5388	
	spalné teplo vzorku [MJ/kg]	25,66	25,05	25,34	
	spalné teplo paliva [MJ/kg]	25,35			
STANOVENÍ OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY	hmotnost Kelímku a víčka [g]	19,6983	22,8097	19,4437	
	hmotnost vzorku [g]	1,0175	1,0346	1,1216	
	hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]	20,7158	23,8443	20,5653	
	hmotnost kelímku, víčka a vzorku po žihání [g]	19,8579	22,9726	19,6192	
	obsah prchavé hořlaviny v bezvodém vzorku [%]	83,39	83,34	83,45	
	obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]	83,40			
VÝPOČET VÝHŘEVNOSTI	obsah vodíku paliva [%]	8,2814	8,2814	8,2814	
	výhřevnost vzorku [MJ/kg]	23,71	23,10	23,39	
	výhřevnost paliva [MJ/kg]	23,40			

STANOVENÍ OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY				len odpad			hořčice semena			quinoa odpad 2		
osah vody ve vzorku [%]				vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
hmotnost kelímku a víčka [g]				5,42			5,88			7,67		
hmotnost vzorku [g]				22,5966	23,0271	19,4869	20,809	21,2988	20,3199	21,0168	20,3927	21,9416
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]				1,0237	1,1074	1,0209	1,023	1,0179	1,0171	1,0109	1,0062	1,0349
hmotnost kelímku, víčka a vzorku po žhání [g]				23,6203	24,1345	20,5078	21,832	22,3167	21,337	22,0277	21,3989	22,9765
obsah prchavé hořlaviny v bezvodém vzorku [%]				22,8237	23,2724	19,7099	20,9648	21,4748	20,4896	21,2505	20,6268	22,1849
obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]				76,54	77,85	78,16	83,82	82,71	83,32	74,96	76,73	76,49
				77,52			83,28			76,06		
STANOVENÍ OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY				světlíce zrn			lnička semena			žit		
osah vody ve vzorku [%]				vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
hmotnost kelímku a víčka [g]				5,41			5,95			7,69		
hmotnost vzorku [g]				22,1572	20,7203	22,7916	22,2958	20,3665	20,0973	20,1969	21,0204	20,7198
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]				1,1036	1,0652	1,1807	1,0329	1,0136	1,0175	1,1877	1,0584	1,1554
hmotnost kelímku, víčka a vzorku po žhání [g]				23,2608	21,7855	23,9723	23,3287	21,3801	21,1148	21,3846	22,0788	21,8752
obsah prchavé hořlaviny v bezvodém vzorku [%]				22,3197	20,8739	22,9651	22,4383	20,5013	20,2355	20,3789	21,1828	20,8956
obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]				84,43	85,58	85,31	85,33	86,70	86,42	83,40	84,66	84,78
				85,11			86,15			84,28		
STANOVENÍ OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY				amarant			seno pelety			sláma pelety		
osah vody ve vzorku [%]				vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
hmotnost kelímku a víčka [g]				6,69			6,44			7,16		
hmotnost vzorku [g]				20,3637	20,8091	19,4435	22,1571	22,2971	20,0973	20,3956	22,7906	21,9451
hmotnost kelímku, víčka a vzorku [g]				0,9502	1,0054	1,0164	1,0832	1,0294	1,1411	1,0586	1,0824	1,0721
hmotnost kelímku, víčka a vzorku po žhání [g]				21,3139	21,8145	20,4599	23,2403	23,3265	21,2384	21,4542	23,873	23,0172
obsah prchavé hořlaviny v bezvodém vzorku [%]				20,5647	21,0067	19,6449	22,4442	22,5705	20,4005	20,6273	23,0151	22,1785
obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]				77,33	80,35	80,18	71,67	73,44	73,43	76,42	79,26	78,23
				79,29			72,85			77,97		